

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU
Veneteknologian koulutusohjelma

Tomi Anttila

SÄHKÖMOOTTORIN HYÖTYSUHDEMITTAUKSEN
SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Opinnäytetyö 2013

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Veneteknologian koulutusohjelma

ANTTILA, TOMI	Sähkömoottorin hyötysuhdemittauksen suunnittelu ja toteutus
Opinnäytetyö	28 sivua + 4 liitesivua
Työn ohjaaja	Mikko Pitkäaho
Toimeksiantaja	Oceanvolt Oy
Joulukuu 2013	
Avainsanat	hyötysuhde, sähkömoottori, hydrauliiikka

Työn tarkoituksena oli suunnitella ja tehdä kustannuksiltaan kohtuullinen laitteisto, joka mahdollistaa sähkömoottoreiden hyötysuhteen mittaamisen. Tavoitteena oli ajaa kahden Oceanvolt Oy:n vetolaitteissaan käyttämän moottorin hyötysuhde- ja rasiustestejä. Hyötysuhdetesteillä oli tarkoitus vahvistaa valmistajan ilmoittamia arvoja yhdessä muun laitteiston kanssa. Kokonaisjärjestelmän osalta rasiustesteillä pyrittiin saamaan tietoa moottoreiden, akuston ja moottoriohjaimen käyttäytymisestä pitkäkestoisessa ajossa suurella kuormalla.

Hyötysuhteen määrittämiseksi on tiedettävä moottorin kuluttaman sähkötehon lisäksi akselin kulmanopeuden ja vallitsevan momentin tulo eli moottorin tuottama teho. Mitattavista suureista momentin määrittäminen toteutettiin soveltaen fysiikan periaatteita momentin vaikutuksesta jäykässä kappaleessa. Näin mahdollistettiin yksinkertaisen voima-anturin käyttö mittauksissa.

Momentin mittaamiseksi on saatava aikaan testattavan sähkömoottorin pyörimistä vastustava voima. Tarvittava vastus päätettiin toteuttaa hydraulisella järjestelmällä, jossa hydraulipumppua pyörittämällä aikaan saatua nestevirtaa jarrutettiin säädettävällä vastusventtiilillä.

Laitteiston ensimmäistä kehitysversiota ei saatu toimimaan odotusten mukaisesti, joten rakenne ja toimintaperiaate päätettiin muuttamaan. Muutos ei poistanut varsinkaan resonointiin liittyviä ongelmia, joten hyötysuhteen mittaus tavoitellulla tarkkuudella jäi toteutumatta.

Työn tuloksena syntyi kompakti testilaitteisto, jota hyödynnettiin Midnightsun-aurinkoveneprojektissa. Oceanvolt Oy:n tarpeisiin laitteistolla tehtiin moottoreille todellisen käyttötilanteen mukaista rasiustestausta.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Boat Technology

ANTTILA, TOMI

Planning and Realization of Electric Motor

Efficiency Measurement

Bachelor's Thesis

28 pages + 4 pages of appendices

Supervisor

Mikko Pitkäaho

Comissioned by

Oceanvolt Ltd

December 2013

Keywords

efficiency, electric motor, hydraulics

The purpose of this project was to design and create an affordable hardware that allows measuring the efficiency of electric motors. The aim was to drive efficiency and stress tests to motors that Oceanvolt Ltd use in their drive units. While the efficiency tests were targeted at confirming the values stated by the manufacturer, the load tests should give information on the behaviour of motors when driving long periods with heavy load.

For the efficiency measurement, it is essential to know the electric power consumption of the motor but also the angular velocity and the torque of the axle. The torque was defined by using physical principles regarding the torque's reaction in a rigid object. That way the use of a simple load sensor could be included in the measurements.

For the measurement of the torque, the generated load had to be sufficient to resist the rotation of the tested electric motor. The required load was generated by means of a hydraulic system where the hydraulic stream produced by rotating the hydraulic pump was reduced with an adjustable valve.

Because the hardware did not function sufficiently enough, the construction and mode of the operation were changed. The change could not solve the crucial problems relating to the resonance, and it was impossible to measure the efficiency with the required precision.

The outcome of the project was a compact test hardware that was used in the student solar boat project "Midnightsun". An efficient hardware was created for Oceanvolt Ltd motors, and load tests were successfully carried out that are qualified for real life situations.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	6
2	LÄHTÖKOHDAT	7
3	SUUNNITTELU	7
3.1	Toimintatapa	8
3.2	Asetetut vaatimukset	11
3.3	Rakenneratkaisut	11
3.4	Hydraulijärjestelmän mitoitus	12
3.5	Mittausjärjestelmä	13
4	TOTEUTUS	14
4.1	Runko	14
4.2	Hydraulijärjestelmä	14
4.3	Mittausjärjestelmä	16
5	LAITTEISTON TESTAUS	17
5.1	Havaitut ongelmat	17
5.1.1	Vastuksen pysyminen vakiona	17
5.1.2	Tukipisteen asemoinnin haastavuus	17
5.1.3	Resonointi	18
5.1.4	Hyötysuhdemittauksen haasteellisuus	18
5.2	Toimenpiteet ongelmien poistamiseksi	18
6	MUUTOSTYÖ	20
6.1	Perusteet muutokselle	20
6.2	Muutoksen toteutus	20
7	MOOTTORITESTAUS	21
7.1	Testiajojen tavoitteet	21
7.2	Testattava laitteisto	22
7.3	Havainnot testiajoista	22
8	TULOSTEN TARKASTELU	23
8.1	Testausjärjestelyt	23
8.2	Hyötysuhdetestaus	24
8.3	Rasitustestaus	24
8.4	Virheanalysointi	26
9	KÄYTTÖ- JA KEHITYSMAHDOLLISUUDET	27
	LÄHTEET	28

LIITTEET

Liite 1. Komponenttiluettelo

Liite 2. Hyötysuhdetestauksen tulokset

SANASTO

CAN-väylä

Laitteiston tietoliikenteen toteutukseen kehitetty automaatioväylä, jolla tarvittavan johdotuksen määrä saadaan minimoitua.

Dynamometri

Dynamometri on yleisimmin jousivaakaan perustuva voiman mittari. Dynamometrikseksi kutsutaan myös laitetta, jolla mitataan pyörivän voimakoneen kehittämä akseliteho. (Koululaisen tietosanakirja, osa 1 1969: 835.)

Kavitoida

Nesteen paineen laskiessa höyrystymispaineen alle muodostuu höyrykuplia, joiden äkillinen romahtaminen paineen noustessa aiheuttaa muutoksia virtauksessa tai jopa materiaalin kulumista eli kavitaatioeroosiota. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2008: 106.)

Kierrostilavuus

Pumpun siirtämä nestemäärä yhtä käyttöakselin kierrosta kohti, kun liitäntöjen välillä ei ole paine-eroa. (Kauranne ym. 2008: 142.)

Lämmönvaihdin

Laite, jossa tapahtuu lämpöenergian siirtymistä kahden erillään olevan aineen välillä. Lämpöenergian siirtymisnopeuteen vaikuttavat aineiden lämpötilaero, virtausnopeudet ja lämmönvaihtimen aktiivinen pinta-ala. (Kauranne ym. 2008: 398.)

Ominaislämpökapasiteetti

Lämpökapasiteetti, joka ilmaisee lämpötilan nostamiseen yhdellä kelvinillä tarvittavan energiamäärän jaettuna massalla. (Inkinen, Manninen & Tuohi 2006: 242.)

Paineenrajoitusventtiili

Paineenrajoitusventtiilien tehtävänä on rajoittaa järjestelmäpaineen suuruus haluttuun arvoon ja estää siten vauriot, jotka paineen rajaton kasvu aiheuttaisi. (Kauranne ym. 2008: 259.)

Vastusventtiili

Vastusventtiilillä vaikutetaan tilavuusvirran suuruuteen säätämällä vaikuttavaa kuristusta. Tilavuusvirta riippuu myös nesteen ominaisuuksista ja vastusventtiilin yli vaikuttavasta paine-erosta.

1 JOHDANTO

Oceanvolt Oy on suomalainen veneiden sähköisiin propulsiojärjestelmiin erikoistunut yritys. Kansainvälisille markkinoille suuntautunut yritys on kehittänyt toimintaansa kohti ympäristöystävällisempää veneilyä jo kahdeksan vuoden ajan. Osoituksena kehityksen onnistumisesta Oceanvolt on saanut useita tunnustuksia, joista viimeisimpänä Sail Magazine -lehden 2013 Pittman Innovation Award -palkinto. (Pittman Innovation Award.)

Oceanvolt Oy:n kiinnostava ehdotus toteuttaa sen käyttämien sähkömoottorimallien hyötysuhteen testaus valikoitui opinnäytetyöni lähtökohdaksi. Tarttuessani projektiin oli Kymenlaakson ammattikorkeakoulun Metsolan toimipisteen tiloista löydetty tehtävään tarkoitettu Froude-mallinen dynamometri, jonka muutostöin ajateltiin soveltuvan testaukseen. Laitteen toimivuus kyseisiin testeihin osoittautui kuitenkin heikoksi, mikä johtui moninkertaisille tehoille tarkoitetun rakenteen aiheuttamasta virheestä. Ongelmana oli myös vanhanaikainen mittaustekniikka, joka ei tukenut atk-pohjaista tiedonkeräystä.

Työ päätettiin aloittaa puhtaalta pöydältä tarkoituksena toteuttaa juuri kyseisille moottoreille räätälöity, kattavalla ja tarkalla mittaustiedon keräysmahdollisuudella varustettu testilaitteisto.

Tärkeä osatekijä opinnäytetyön aloittamiseksi oli myös veneteknologian koulutuslinjalla käynnissä oleva aurinkoveneprojekti, jonka yhteydessä on toteutettu kattavasti veneen suunnitteluun ja rakentamiseen liittyvää tutkimusta. Yksi syventymistä vaatinut kohde projektissa on ollut voimansiirron hyötysuhteen optimointi. Keskeisessä asemassa tavoitteeseen pääsemiseksi on sähkömoottorin hyötysuhde. Ensimmäisen aurinkoveneen voimanlähteenä käytetty sähkömoottori valittiin ilman hyötysuhteen mittauksia valmistajan datalehtien mukaan. Uuden veneen sähkömoottorista pidettiin tarpeellisenä saada kattavampaa tietoa suorituskyvyn ja luotettavuuden suhteen.

2 LÄHTÖKOHDAT

Opinnäytetyön lähtökohtana oli toteuttaa sähkömoottoreiden testilaitteisto. Tärkeimpänä tutkimuskohteena oli sähkömoottoreiden hyötysuhteeseen liittyvä tieto, eli kuinka suuren osan käyttämästään sähköenergiasta moottori pystyy muuntamaan pyörimisliikkeeksi (kaava 1).

Hyötysuhde:

$$\eta = \frac{\text{saatu energia tai työ}}{\text{viety energia tai työ}} = \left(\frac{\text{saatu teho}}{\text{viety teho}} = \frac{\text{antoteho}}{\text{ottoteho}} \right) \quad (1)$$

Sähkömoottoriin viety energia on tässä tapauksessa ottoteho eli virran ja jännitteen tulo. Koneesta saatu energia eli antoteho saadaan lasketuksi kaavan 2 avulla, kun tiedetään pyörimisnopeus ja momentti.

Tehon, pyörittävän momentin ja kulmanopeuden yhteys:

$$P = M * \omega = M * 2 * \pi * n \quad (2)$$

M = momentti

ω = kulmanopeus

n = pyörimisnopeus

Koneesta saadun tehon määrittämiseen kyseisessä tapauksessa käytettävää mittauslaitetta kutsutaan dynamometriksi.

3 SUUNNITTELU

Lähtökohtana testilaitteiston suunnittelulle oli edulliset toteutuskustannukset, joihin päästiin hyödyntämällä olemassa olevia materiaaleja ja tarvikkeita.

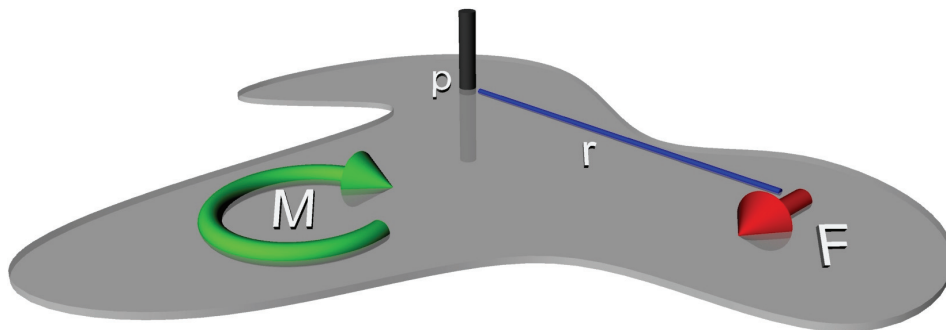
Laitteiston toimintaperiaatesuunnitelma herätti monia kysymyksiä, joita käsitellään seuraavissa luvuissa.

Keskustelun ja pohdinnan kautta syntyneet visiot muotoutuivat lopulta toteutuskelpoiseksi ratkaisuksi. Rakentamisen edetessä pääasiallisena suunnittelun välineenä käytettiin Rhinoceros-suunnitteluohjelmaa. Lisäksi apuvälineenä rakenteen hahmottamiseksi käytettiin konkreettista sommittelua hyödyntäen tiedettyjä mittoja ja olemassa olevia komponentteja.

Tarkoitus oli saada aikaan testilaitteisto, joka mahdollistaisi sähkömoottorin hyötysuhteen määrittämisen laajalla kierroslukualueella. Tätä varten oli pystyttävä mittaamaan moottorin käyttämä sähköteho, jota verrataan pyörimisnopeudesta ja moottorin synnyttämästä momentista laskettuun antotehoon. (Kaava 1)

3.1 Toimintatapa

Momentin mittaamisessa päädyttiin hyödyntämään fysiikan sääntöä, jonka mukaan mielivaltaisesta pisteestä jäykkään kappaleeseen aiheutettu momentti vallitsee yhtä suurena kaikkialla kappaleessa. Suunnitellussa dynamometrissä momentin mittaaminen perustuu tämän nojalla voiman mittaamiseen pisteestä, jonka etäisyys tukipisteen suhteen tiedetään (kuva 1). Valittu toteutustapa mahdollisti edullisen voima-anturin käytön. Markkinoilta löytyy myös pyörimismomentin mittaamiseen tarkoitettuja momenttiantureita. Tällaisella anturilla laitteiston mekaniikasta olisi tullut huomattavasti yksinkertaisempi, mutta antureiden korkean hinnan vuoksi laitteiston kokonaishinta olisi noussut moninkertaiseksi.



Kuva 1. Moottori aiheuttaa yhdestä pisteestä laakeroituun kappaleeseen momentin (M), joka on sama kuin mitatun voiman (F) ja nivelpisteestä (p) mitatun etäisyyden (r) tulo.

Testilaitteistossa tarvittavan vastuksen tuottamiseen käytettävistä vaihtoehtoista mekaanisen jarrun hyödyntäminen rajoittuu kapealle pyörimisnopeusalueelle. Hitaalla nopeudella lepo- ja liikekitkan erosta aiheutuva stick-slipp-ilmiö tuottaa pintojen epäsäännöllisyydestä johtuvaa haitallista värähtelyä. Mekaanisen jarrun tuottaman lämpöenergian siirtoon ja jarruelementtien kulutuskestävyyteen pitkissä testiajoissa liittyvät rakenneratkaisut eivät myöskään puoltaneet vaihtoehtoa.

Vastuksen toteuttaminen käyttäen toista sähkömoottoria oli myös vaihtoehtoinen ratkaisu. Näin toteutettuna kuorman säätäminen on monimutkaisempaa ja vaatii tarkoitukseen sopivan moottoriohjaimen. Sähköinen vastus mahdollistaisi myös dynamometrin käytön toiseen suuntaan, niin että testattava sähkömoottori toimii generaattorina. Tämän ominaisuuden testaamisesta olisi hyötyä käytettäessä moottoreita myös sähköön tuottamiseen. Tällaisen dynamometrin suunnittelu päätettiin jättää myöhemmäksi ja keskittyä mahdollisimman yksinkertaisen laitteiston toteuttamiseen, jotta kuormitustestit saataisiin tehtyä nopealla aikataululla.

Hydraulipumpun käyttämistä vastuksena puolsi sen suuri tehonkäsittelykyky. Hydraulijärjestelmän eri osissa esiintyvien kitkojen ja vuotojen seurauksena syntyvät tehohäviöt muuttuvat lämmöksi, josta osa varastoituu itse järjestelmään ja osa siirtyy järjestelmän pintojen kautta ympäristöön sekä johtumalla että säteilemällä. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2008: 83.)

Koko järjestelmä voidaan tulkita hydrauliiikkakomponentiksi, joka muuntaa tietyn määrän ottotehostaan antotehoksi. Kaavan 1 mukaisesti voidaan todeta energian muuntuvan hydraulijärjestelmässä hukkalämmöksi hydraulinesteen liikettä rajoittavien ja pyörimistä vastustavien kitkojen vuoksi, kun hyötyenergiaa ei saada. (Kauranne ym. 2008: 83.)

Hydraulijärjestelmän merkittävin lämpöä varastoiva osa on neste, mutta myös pumpun ja putkiston osuus ovat merkittävät. Yhdessä ne kykenevät varastoimaan lämpöenergiaa tiettyyn määrään asti. Yleisimpien hydraulinesteiden käyttöalueella pysyminen edellyttää varastoituneen lämmön aktiivista siirtämistä pois järjestelmästä, vaikka pintojen kautta ympäristöön johtumalla ja säteilemällä siirtyvän lämpöenergian määrä kasvaakin lämpötilaeron mukaan. Lämpötila kohoaa suurimmilla tehoilla yli käyttöalueen jo muutamassa minuutissa (kaava 3).

$$\text{Lämpömäärä: } Q = m * c * \Delta T \quad (3)$$

m = massa

c = ominaislämpökapasiteetti

ΔT = lämpötilan muutos

Varastoitunut lämpöenergia siirretään järjestelmän ulkopuolelle lämmönvaihtimella. Lämmönvaihtimen tyypiksi valikoitui koulun varastosta löytynyt levylämmönvaihdin, joka tehokkuudeltaan todettiin riittäväksi. Lämmönvaihtimen suurin suositeltu virtausnopeus oli ilmoitettu vain vedelle, mutta viskositeettien tarkastelun myötä lämmönvaihtimen virtauskapasiteetin pääteltiin riittävän myös hydraulinesteelle ilman, että paine-ero kasvaisi liian suureksi. Lisäksi levylämmönvaihtimen kompakti rakenne oli eduksi laitteistossa.

Vastuksen säätäminen saatiin toteutettua yksinkertaisimmin vastusventtiilillä, jolla vaikutettiin tilavuusvirran suuruuteen ja siten pumpun pyörimistä vastustavaan voimaan eli momentin suuruuteen. Rakenteeltaan vastusventtiili on virtausta kuristava; sen läpäisemän tilavuusvirran suuruus riippuu säädetyn vastusasetuksen lisäksi myös ulkoisista tekijöistä eli kuristuksen yli vaikuttavasta paine-erosta sekä nesteen ominaisuuksista (Kauranne ym. 2008: 308).

Edellä mainittujen ominaisuuksien perusteella testilaitteistossa päädyttiin käyttämään hydraulista vastusta.

3.2 Asetetut vaatimukset

Oceanvolt Oy:n antamien tietojen perusteella määräytyi hydraulijärjestelmältä vaadittava tehonkäsittelykyky. Tarvittavaksi momentiksi ilmoitettiin 40 Nm ja nimelliskierrosluvuksi 2400 1/min. Akustolta saatavan nimellisjännitteen ollessa 58 V ja maksimivirran 200 A voitiin olettaa akselitehon jäävän alle 11,6 kW (kaava 4).

$$\text{Kuorman teho: } P = U * I \quad (4)$$

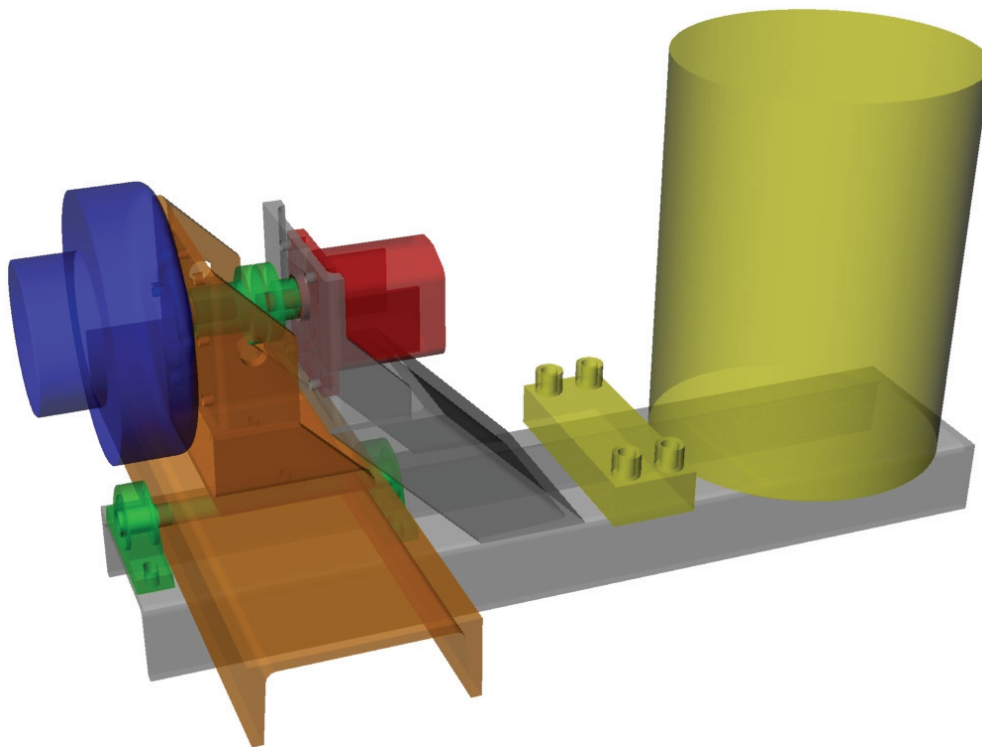
U = jännite

I = virta

3.3 Rakenneratkaisut

Laitteiston rungon rakenne pyrittiin tekemään mahdollisimman yksinkertaiseksi ja jäykäksi. Rakennusmateriaalina teräksinen UNP-profiili osoittautui tarkoituksenmukaiseksi valinnaksi. Materiaalivalinnan ansiosta rakenteen lujuusvaatimukset täyttyivät moninkertaisesti eikä yksityiskohtaisempia lujuuslaskelmia tehty. (Kuva 2)

Turvallisuusnäkökohdat otettiin huomioon sähkölaiteissa ja hydraulijärjestelmässä. Koska sähkölaitteiden jännitteet olivat heikkovirran tasolla ei erityisempiin suojauksiin ollut tarvetta. Hydraulijärjestelmässä vallitseva suuri paine yhdistettynä korkeaan lämpötilaan edellytti testiajojen aikana oikeanlaisten henkilösuojainten käyttöä. Lisäksi turvallisuusriskin aiheuttivat pyörivissä kappaleissa vallitsevat suuret voimat, joilta suojauduttiin välttämällä takertumisvaaran aiheuttavia varusteita ja testijärjestelyt suunniteltiin siten, että tarvittava turvaetäisyys säilyi.



Kuva 2. Laitteisto koostuu runkoon (harmaa) kiinnitetyistä komponenteista. Keinuu (oranssi), johon sähkömoottori (sininen) on laakeroitu runkoon. Moottori on liitetty sakarakytkimellä (ylin vihreä) hydraulipumppuun (punainen). Hydraulijärjestelmään kuuluvat lämmönvaihdin ja öljysäiliö on merkitty keltaisella.

3.4 Hydraulijärjestelmän mitoitus

Tärkein hydraulipumpun kokoa määrittävä tekijä oli tarvittava momentti. Kun myös järjestelmän suurin mahdollinen paine tiedettiin, saatiin vaadittava kierrostilavuus lasketuksi kaavaa 5 käyttäen. Optimoimalla hydraulipumpun kierrostilavuus saatiin virtauksen määrä pidettyä mahdollisimman pienenä. Näin vaatimukset muiden komponenttien osalta jäivät helpommiksi toteuttaa.

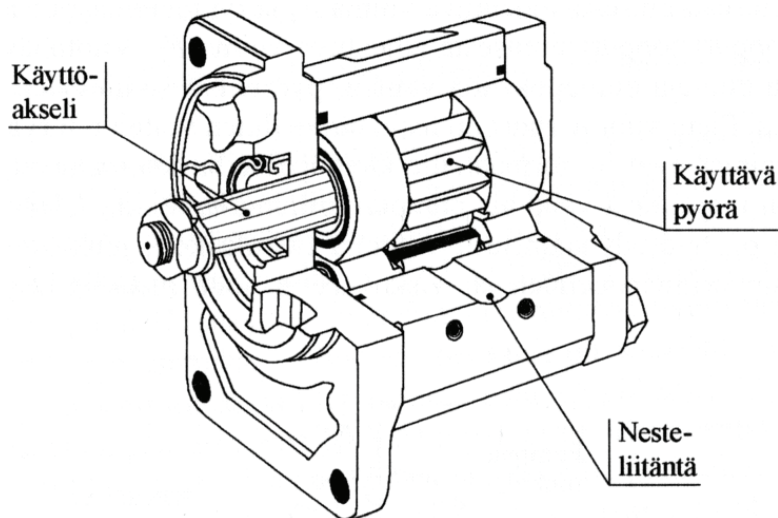
$$\text{Pumpun kierrostilavuus: } V_k = \frac{T * 2 * \pi * \eta_{hm}}{\Delta p} \quad (5)$$

T = momentti

η_{hm} = hydromekaaninen hyötysuhde

Δp = paine-ero

Pumpuksi valikoitui ulkopuolisesti sivuava kaksipyöräinen hammaspyörä-pumppu (kuva 3). Yksinkertainen rakenne tekee pumpusta hankintahinnaltaan edullisen ja paljon käytetyn, joten kattavasta valikoimasta oli helppo löytää tarkoitukseen sopivan kokoinen. Kierrostilavuudeltaan riittäväksi pumpuksi valittiin Meta Hydraulicin malli, jonka $14 \text{ cm}^3/\text{n}$ kierrostilavuus tuotti laskennallisesti suurimmalla käyttöpaineella $50,6 \text{ Nm}$ momentin olettaessa hydromekaaniseksi hyötysuhteeksi $0,88$. Näin ollen pyörimisnopeudella 2400 1/min tehokapasiteetti ulottui selvästi yli tarvittavan. (Kaava 2)



Kuva 3. Ulkopuolisesti sivuava kaksipyöräinen hammaspyöräpumppu. (Kauranne ym. 2008: 151.)

3.5 Mittausjärjestelmä

Hyötysuhteen määrittämiseksi oli saatava selville moottorille viety ja sieltä saatu teho. Tämä toteutettiin mittaamalla moottorin käyttämän jännitteen ja virran lisäksi tuotettu momentti ja pyörimisnopeus. Mittausjärjestelmän rungon muodostivat National Instrumentsin Labview-ohjelmisto ja tietokoneen USB-porttiin liitettävä mittakortti, jolla voidaan mitata analogiasignaaleja $\pm 10 \text{ V}$ sekä digitaalisignaaleja. Mittausjärjestelmän anturit on luetteloitu hankintakustannuksineen liitteessä 1.

Jännitteen mittaus suunniteltiin toteutettavaksi kytkemällä kaksi vastusta moottorin johtimien välille sarjaan. Mittaus suoritettiin vastusten välistä, jolloin jännite aleni mittakortille soveltuvaksi Ohmin lain mukaisesti suhteessa

vastusten suuruuteen. Virran mittauksessa päädyttiin edullisen Hall-tyyppisen anturin käyttöön. Toisena vaihtoehtona ollut shuntti-tyyppinen virtamittari olisi vaatinut erillisen mV-V -vahvistimen, jotta olisi saavutettu riittävä mittatarkkuus jännite-eron mittaamiseen. Virranmittausanturilta analoginen jännitetieto siirrettiin tiedonkeräysjärjestelmään.

Momentin määrittämiseen päätettiin käyttää voima-anturia, jonka kapasiteetiksi määrytyi 300 newtonia, asemointi ja vaadittu mitta-alue huomioiden. Anturin tuottama millivolttisignaali siirrettiin jännitevahvistimen kautta mittakortille. Pyörimisnopeus mitattiin induktiivisen anturin avulla. Anturi asennettiin sakarakytkimen kohdalle, jolloin kierrosnopeus voitiin laskea mittaamalla sakaroiden antamien pulssien taajuus.

4 TOTEUTUS

4.1 Runko

Rungon rakentamista varten raaka-aineeksi valitusta teräksisestä 180*70 mm UNP-profiilista leikattiin piirustusten mukaiset kappaleet, jotka koneistettiin suunnitelman mukaisesti ennen hitsausta. Hitsausmenetelmänä käytettiin puikkohitsausta.

4.2 Hydraulijärjestelmä

Hydraulisen vastusjärjestelmän ytimenä toimiva hydraulipumppu kiinnitettiin dynamometriin samalle akselilinjalle testattavan moottorin kanssa. Pumpulta lähtevä hydrauliputki johti säädettävälle vastusventtiilille ja paineenrajoitusventtiilille, joka päästäisi virtauksen lävitseen häiriötilanteessa, mikäli vastusventtiili suljettaisiin kokonaan tai virtaus lämmönvaihtimessa estyisi. Vastus- ja paineenrajoitusventtiiliin yhteyteen asennettiin myös analoginen painemittari, joka osoitti pumpun synnyttämän paineen. (Kuva 4)

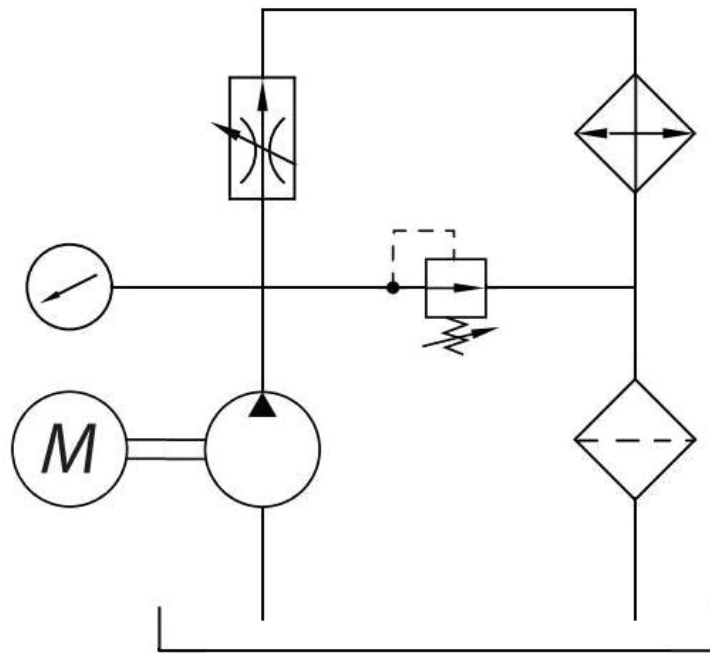
Lämmönvaihdin oli liitetty vesijohtoverkon kylmävesiliitäntään. Lämpöenergia siirtyi veden mukana pois järjestelmästä. Öljysäiliö oli valmistettu 20 litran vetoisesta kemikaaliastiasta, jonka kanteen tarvittavat läpiviennit tehtiin. Järjestelmässä öljyn suodatus toteutettiin säiliön kanteen asennetulla paluusuodattimella.

Kuvattu hydraulijärjestelmä, jonka yksityiskohtainen komponenttiluettelo on liitteenä 1, saatiin rakennettua tiiviiksi kokonaisuudeksi päätymällä kompromissiin öljysäiliön tilavuuden suhteen. Pumpun tuottaman virtauksen perusteella olisi suositusten mukaisen nestemäärän oltava vähintään kolminkertainen verrattuna toteutuneeseen. Komponentit mitoitettiin suurimman paineen ja tilavuusvirran mukaan. Suuren öljynvirtauksen vuoksi järjestelmässä päätettiin käyttää yhtä kokoa suurempia komponentteja, jotka liitosten osalta sopivat suoraan valittuun putkikokoon. Ajettaessa suurilla kierroksilla saadaan vastus näin pidettyä myös mahdollisimman alhaisena. Valittaessa putkisto 3/4-tuuman liitäntöjen mukaisesti saadaan virtausnopeudeksi 2,2 m/s (kaava 6). Virtausnopeussuositus ylittää näin imukanavan maksimiarvon 1,5 m/s, mutta paluukanavassa nopeus on suositusten mukainen. (Kauranne ym. 2008: 416.) Tiivis kokonaisuus ja jäykkien hydrauliletkujen heikko taivuteltavuus edellyttivät letkujen valmistamisen mittatilaustyönä.

$$\text{Keskimääräinen virtausnopeus: } v = \frac{q_v}{A} \quad (6)$$

q_v = tilavuusvirta

A = virtauskanavan poikkileikkauksen ala



Kuva 4. Hydraulikkapiiri

4.3 Mittausjärjestelmä

Kattavan mittausjärjestelmän toteutus jäi suunniteltua pelkistetyimmäksi Labview-ohjelmiston käytön osoittautuessa oletettua vaativammaksi suhteessa asetettuun aikatauluun.

Jännitteen mittaus suoritettiin akustosta käyttäen tarkoitukseen soveltuvaa ja tarkkuudeltaan riittävää yleismittaria. Virran mittaus toteutettiin pihtimittarilla, jonka tarkkuus oli vain välttävä kyseiseen tarkoitukseen.

Momentin mittaaminen toteutettiin suunnitelman mukaisesti voima-anturia käyttäen. Anturi kalibroitiin punnitsemalla tiedettyjä painoja, jolloin saatiin selville jännitesignaalin voimakkuuden ja anturiin vaikuttavan voiman välinen funktio. Mittauspisteiden suuren määrän vuoksi saatiin todettua myös anturin käyttäytyvän lineaarisesti mittausalueella. Labview-ohjelmassa jännitesignaali skaalattiin newtoneiksi käyttäen selvitettyä funktiota. Momentin suuruus saatiin kertomalla voima mittauspisteen ja tukipisteen välisellä etäisyydellä.

Kierrosluku saatiin moottorin tietoja esittävästä erillisestä näytöstä. Tarvittavat tiedot luettiin mittalaitteista ja kerättiin tietokoneen laskentaohjelmaan.

5 LAITTEISTON TESTAUS

Laitteiston ensimmäiset testiajot suoritettiin Oceanvolt Oy:n toimittamalla laitteistolla, joka sisälsi moottorin lisäksi moottoriohjaimen ja akuston.

Testauksessa hydraulijärjestelmä osoittautui toimivaksi. Vastusta oli helppo säätää vastusventtiilillä ja painemittari reagoi odotetusti muutoksiin. Hydraulineste- tai vesivuotoja ei testeissä ilmennyt. Hydraulipumppu aiheutti kohtuullisen määrän melua, mikä on hammaspyöräpumpulle tyypillistä. Syynä tähän on pumpun hammasluvusta riippuva epätasainen tilavuusvirta. Suurempi hammasmäärä tekisi käynnistä tasaisemman, mutta pienentäisi samalla kierrostilavuutta. (Hydraulitekniikka: 32.)

5.1 Havaitut ongelmat

5.1.1 Vastuksen pysyminen vakiona

Testiajojen alussa vastus osoittautui kevenevän ajan myötä. Syynä tähän oli hydraulinesteen lämpenemisestä johtuva viskositeetin aleneminen ja mahdollisesti ilman sekoittuminen nesteeseen voimakkaan virtauksen ja alimitoitettun säiliön vuoksi. Lämpötilan tasoituttua lauhdeveden virtausta säätämällä, pysyi vastus kuitenkin luotettavasti vakiona.

5.1.2 Tukipisteen asemoinnin haastavuus

Voima-anturin ja keinun välisen tukipisteen asemointi osoittautui haastavaksi. Anturin asettamista nollatasoon hankaloitti epäkeskeisyys kytkimen pyöriessä. Siksi voima-anturille aiheutunut kuorma vaihtui akselin asennon mukaisesti.

5.1.3 Resonointi

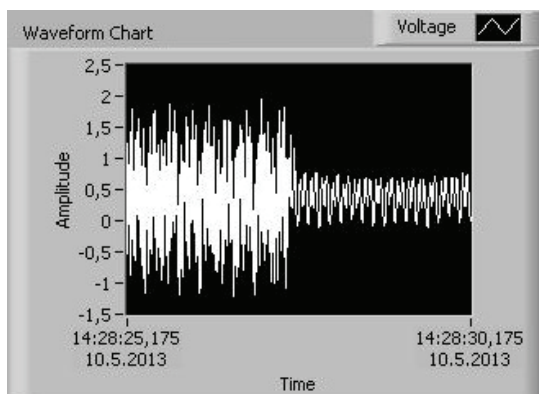
Voimakasta resonointia ilmeni kohtalaisen laajalla kierroslukualueella. Resonoinnin voimakkuus mukaili vastuksen aiheuttamaa kuormaa. Resonoinnista johtuva liike siirtyi rakenteen vuoksi suoraan voima-anturille tehden mittatiedon lukemisen mahdottomaksi.

5.1.4 Hyötysuhdemittauksen haasteellisuus

Alustavien hyötysuhdelaskelmien virheellisyyteen oletettiin osasyynä myös tukipisteen siirtyminen, mikä johtui voima-anturin muodonmuutoksesta ja anturin liian joustavasta kiinnityksestä. Moottori ja hydraulipumppu olisi saatava pysymään tarkasti samalla akselilla, jotta momentti kokonaisuudessaan siirtyisi voima-anturille.

5.2 Toimenpiteet ongelmien poistamiseksi

Suuri osa resonoinnin syyksi luullusta häiriöstä osoittautui sähköiseksi ja kokeilemalla havaittiin, että mittaustiedon lukemista hankaloittanut häiriö poistui kuvan 5 mukaisesti, kun dynamometrin runko maadoitettiin pistorasian kautta.



Kuva 5. Voima-anturilta tulevan jännitetiedon muutoksen näkyminen Labview-ohjelmassa kytkettäessä maadoitusjohto.

Mekaaninen resonointi oli voimakasta vain tietyllä kierroslukualueella. Laitteistossa moottorin kiinnitysalustana oleva keinu toimi värähtelijänä, jonka ulkoisena voimanlähteenä epäkeskeinen moottori toimi. Voiman vaikuttaessa värähtelijän liikkeen suunnassa syntyi pakkovärähtelyä. Resonointialuetta saatiin kavennettua ja siirrettyä alemmalle kierroslukualueelle asettamalla keinun molemmille puolille 25 kilogramman lisäpainot. Resonointitaajuuden muutos johtui ominaistajuuden muutoksesta. Massan lisäyksen yhteys taajuuden muutokseen selviää kaavasta 6. (Inkinen, Manninen & Tuohi 2006: 242.)

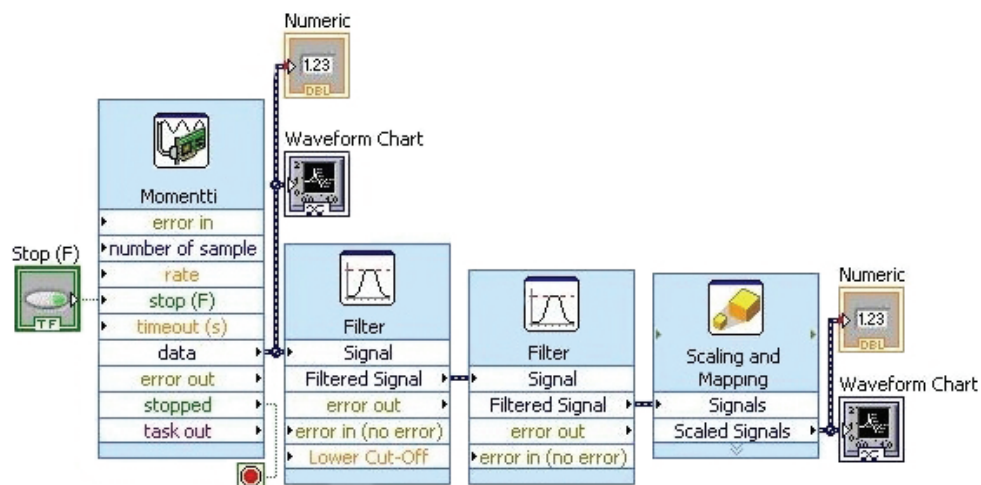
$$\text{Taajuus eli frekvenssi: } f_0 = \frac{1}{2 * \pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

k = jousivakio

m = massa

Anturi vaihdettiin vähäjoustoisempaan, mutta mittausalueeltaan vähemmän optimaaliseen malliin. Lisäksi dynamometri kokonaisuudessaan ankkuroitiin kivilevyllä. Samalle kivilevyllä asetettiin myös voima-anturi, jota varten koneistettiin jalusta oikean korkeuden aikaansaamiseksi.

Labview-ohjelmaan lisättiin kuvan 6 mukaisesti alipäästösuodin, jolla anturin tuottama tieto saatiin selkeämmäksi.



Kuva 6. Näkymä Labview-ohjelman käyttöliittymästä. Jännitesignaalin kulku suotimien ja skaalauksen kautta luettavaan muotoon.

Kytkimen moottoripuoli oli mittavirheen vuoksi jouduttu koneistamaan kahdessa erässä. Tämän oletettiin olevan suurin syy resonointiin. Kytkimen moottoripuoli korvattiin uudesta aihioista koneistetulla osalla.

Ensimmäisessä testiajossa kytkimen kohdistukseen ei paneuduttu riittävästi, sillä oletettiin sakarakytkimen välikummin sallivan mahdollisen kulmapoikkeaman. Asiaan syvennyttiin perusteellisesti ja kytkin rihdattiin paikoilleen heittokelloa apuna käyttäen.

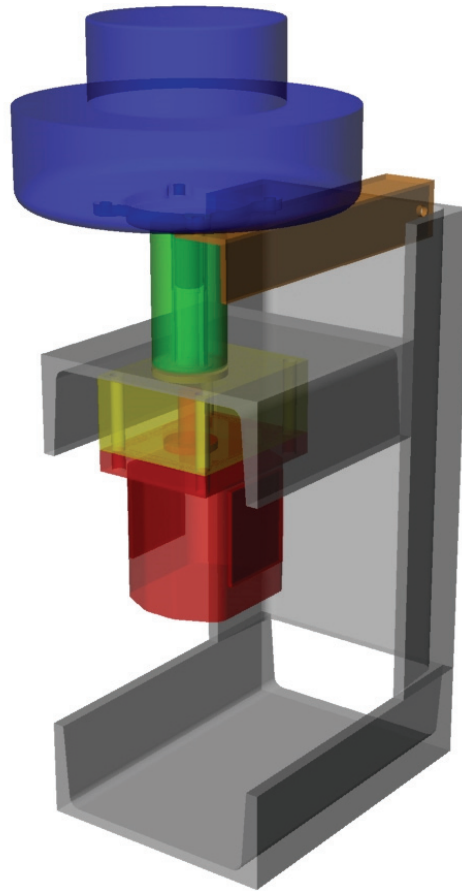
6 MUUTOSTYÖ

6.1 Perusteet muutokselle

Korjaavat toimenpiteet eivät tuottaneet toivottua lopputulosta momentin luotettavaan mittaukseen, joten dynamometrin toimintaperiaate päädyttiin suunnittelemaan uudelleen. Alkuperäisen rakenteen ongelmaksi osoittautui sakarakytkimen pyrkimys keskittyä kytkinpuoliskojen suhteen niin tarkasti, että momentin aiheuttamaa voimaa keinurakenteeseen oli mahdotonta mitata luotettavasti.

6.2 Muutoksen toteutus

Muutoksen mahdollistava lisäosa suunniteltiin Rhinoceros-suunnitteluohjelmaa hyväksi käyttäen. Hydraulijärjestelmään ei tehty rakenteellisia muutoksia. Ainoastaan hydraulipumpussa kiinni olevia letkuja käännettiin moottori-hydraulipumppuyhdistelmän saamiseksi pystyasentoon ja välille lisättiin tukilaakeri, joka otti vastaan moottorin painon ja pyörimistä jarruttavasta voimasta syntyvän sivuttaisen voiman. Moottorin kiinnityskorvakkeisiin pultattiin varsi, joka vastasi voima-anturiin. Tällä järjestelmällä momentti saatiin lasketuksi voima-anturin etäisyyden ja siihen kohdistuvan voiman tulona. (Kuva 7)



Kuva 7. Moottori-hydraulipumppuyhdistelmä käännettynä pystyasentoon. Välille lisätty tukilaakeri (keltainen) ja moottoriin kiinnitetty varsi (oranssi), joka vastaa voima-anturiin. Vihreällä on merkitty sakarakytkimen tilalle lisätty holkki.

7 MOOTTORITESTAUS

7.1 Testiajojen tavoitteet

Tavoitteena oli ajaa kahden Oceanvolt Oy:n vetolaitteissaan käyttämän moottorin osalta hyötysuhde- ja rasiustestejä. Hyötysuhdetesteillä oli tarkoitus verifioida valmistajan ilmoittamat suoritusarvot ja testata laitteiston toimintaa kokonaisuutena. Rasiustesteillä pyrittiin saamaan tietoa moottoreiden ja muun laitteiston käyttäytymisestä pitkäkestoisessa ajossa suurella kuormalla. Erityisesti oli tarpeen saada tietoa tehokkaamman moottorin käyttäytymisestä pidemmässä ajossa, sillä testattu moottorityyppi tulisi jatkossa korvaamaan jo käytössä olevan vastaavan mallin.

7.2 Testattava laitteisto

Laitteisto koostui Oceanvolt Oy:n asennuksissaan käyttämistä komponenteista. Akusto koostui neljästä Torqeedon Power 26-104 -mallisesta lithium-ion -akusta, joiden kunkin kapasiteetti oli 2685 wattituntia ja nimellisjännite 25,9 voltia (Power 26-104, Technical data & dimensions). Akkujen kemiallinen tyyppi oli Li NMC, joka käytössä on suhteellisen turvallinen ja kestää suuren purkukertojen määrän, mutta on energiatiheydeltään kohtuullinen suhteessa parhaimpiin markkinoilla oleviin.

Akut oli kytketty pareittain rinnakkain ja näin muodostuneet parit edelleen sarjaan, jolloin jännite saatiin nostettua moottoriohjaimen syöttöalueelle, 40 ja 75 voltin välille. Akusto pidettiin jatkuvasti latauksessa kahdella latauslaitteella, joiden yhteenlaskettu latausteho oli 640 wattia. Moottorisäätimenä käytettiin mallia, joka tuotti moottorille enintään 200 ampeerin nimellisvirran. Käytännössä maksimivirta oli kuitenkin ohjelmallisesti rajoitettu 160 ampeeriin.

Testattavat moottorit olivat Oceanvoltin AX3-, AX5- ja AX8-vetolaitteissaan käyttämiä. Kestomagneettisynkronimoottoreiden tuottamat tehot kootusta akustosta saatavalla jännitteellä olivat 5 ja 8 kilowattia. Kahdeksan kilowatin moottorin hyötysuhteeksi oli ilmoitettu 92% käyttöjännitteen ollessa 24 V:n ja 72 V:n välillä. Lisäksi testattavaan laitteistoon kuului kaksi CAN-väylään kytkettyä näyttöä ja moottoriohjaimen hallintalaite.

7.3 Havainnot testiajoista

Hydraulijärjestelmän jäähdytys osoittautui riittävän tehokkaaksi myös rasiustesteissä, ja lämpötila pysyi tarpeeksi alhaisena pienelläkin lauhdeveden virtauksella.

Hydraulipumpun aiheuttama melu voimistui hieman testiajojen edetessä. Syyksi todettiin pumpun koneiston kulumisen suuressa rasituksessa. Kulumista lisäsi myös öljyyn sekoittunut ilma, joka kavitointia aiheuttaessaan nopeutti kulumista. Moottori aiheutti edelleen resonointia. Resonointialueen ohitus oli tehtävä moottoria fyysisesti tukien, jotta välttyttiin voima-anturille kohdistuneilta iskuilta.

8 TULOSTEN TARKASTELU

Mittaustulosten aikaansaaminen ei sinällään tarkoita, että niiden perusteella voitaisiin tehdä päätelmiä. Tulosten syntyyn vaikuttavat tekijät on tunnettava mahdollisuuksineen ja rajoituksineen. Lisäksi on tiedettävä, kuinka tuotettua tietoa on käsiteltävä, jotta tulokset saadaan tehokkaasti hyödynnettyä. Tämä merkitsee sitä, että mittaustuloksista tehtyjen laskelmien luotettavuus on pystyttävä arvioimaan järjestelmällisesti. (Mittaustulosten käsittely.)

Vaikka mitattavalla suureella tiedettäisiin olevan tietty arvo, siihen ei yleensä mittauksin päästä. Menetelmien epätarkkuudesta, mittaajasta tai mittauskohteen tilastollisesta luonteesta johtuen mittauksen tuloksena saadaan ainoastaan joukko likiarvoja, joista etsitään mahdollisimman todennäköinen arvo etsitylle suurelle. Mittaustulosten käsittelyllä siis pyritään laskemaan arvoista yksittäinen tulos ja selvittämään tämän luotettavuus. (Mittaustulosten käsittely.)

8.1 Testausjärjestelyt

Testiajot pyrittiin tekemään olosuhteita muuttamatta ja mittaustulosten kirjaaminen toistettiin samassa järjestyksessä. Jännite mitattiin akuston navoista yleismittaria käyttäen ja ampeerimäärä luettiin akusta moottorisäätimelle kulkevaan johtoon asetetusta pihtimittarista. Pyörimisnopeus saatiin moottorisäätimeen liitetystä näytöstä. Momentti mitattiin voima-anturilla, jolta saadusta jännitetiedosta laskettiin Labview-ohjelmalla momentti newtonmetreinä.

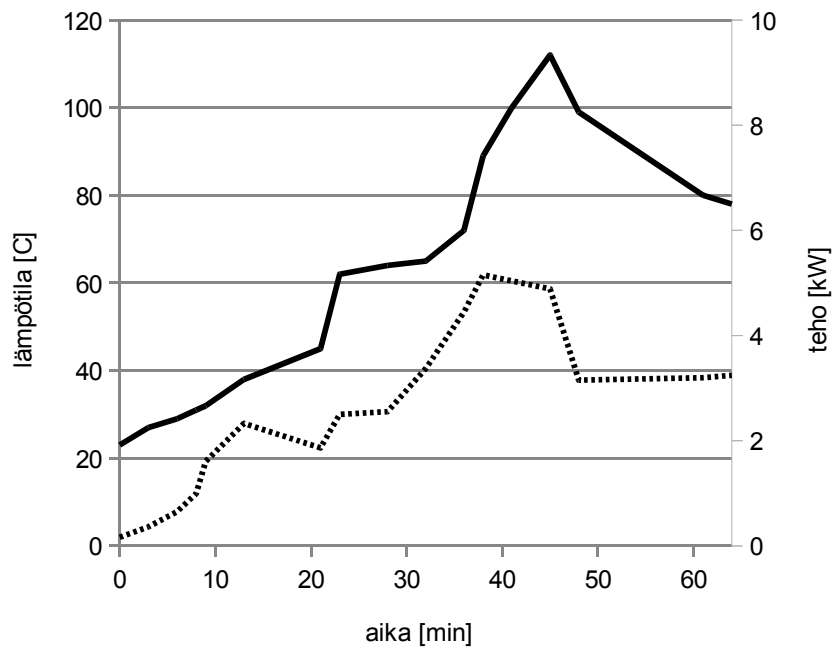
8.2 Hyötysuhdetestaus

Hyötysuhdetestauksen järjestelyitä pyrittiin muuttamaan toimivammiksi useita kertoja. Tehdyistä parannuksista huolimatta testejä ei onnistuttu toistamaan niin, että mittaustulokset olisivat luotettavia. Muutostyön seurauksena syntyneen uuden version myötä käyttöön liittyvät ongelmat rajoittivat yhä testaustoimintaa. Oceanvolt Oy:n laitteiston käyttömahdollisuus moottoreiden osalta oli myös rajoitettu. Aikataulun pitkittyessä testilaitteiston muutostöiden vuoksi ja vertailemalla saavutettavaa mittaustarkkuutta tulosten hyödyntämisen kannalta vaadittavaan tasoon päätettiin työn sisältö koota jo tehtyjen tutkimusten tuloksista. Liitteessä 2 on hyötysuhdetestaukseen liittyvistä testiajoista saadut tulokset.

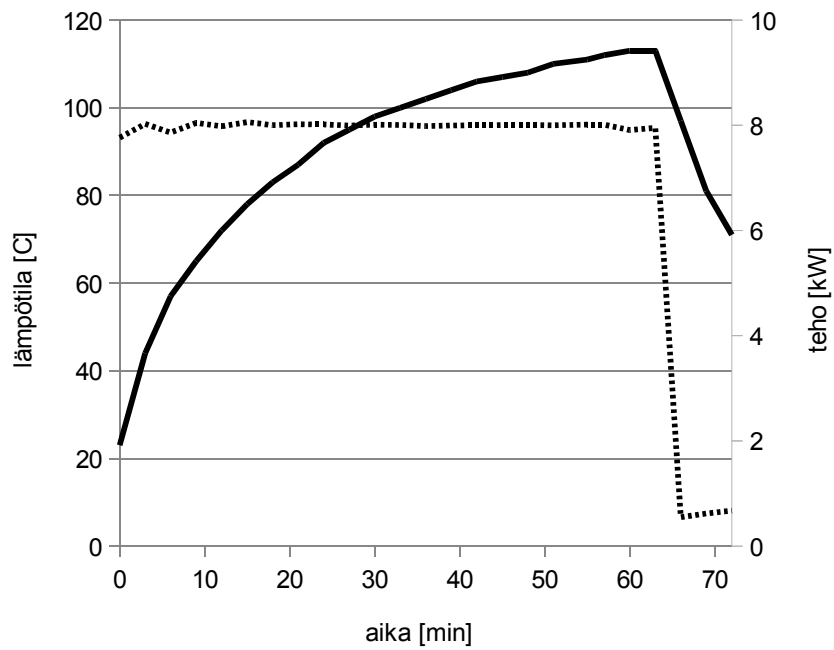
8.3 Rasitustestaus

Rasitustestauksella saatujen tulosten perusteella voitiin todeta AX8-vetolaitteessa käytetyn moottorin toimivan normaalisti ajettaessa poikkeuksellisen suurilla teholla (kuva 9). AX3- ja AX5-vetolaitteissa käytettyä moottoria ajettaessa tehoa vaihdellen havaittiin voimakasta lämpenemistä, mikä edellytti käytetyn tehon rajoittamista testiajon aikana (kuva 9). Lämpeneminen ei myöskään kannustanut pidempiaikaisten testiajojen toteuttamiseen suurimmilla tehoilla. Havaintojen perusteella Oceanvolt Oy teki muutoksen AX5-vetolaitteessa käytettävän moottorin osalta. Suuremman moottorin käyttäminen myös AX5:ssä poistaa havaitun ylikuumenemisriskin.

Moottorilaitteiston akustolta lähtevän johdotuksen ja päävirtakytkimen todettiin lämpenevän huomattavasti tehokkaamman moottorin ajojakson aikana. Mittauksin saatiin selville jännitehäviön suuruus akuston ja moottorisäätimen välisessä johdotuksessa. Koska jännitehäviö oli noin 0,3 voltia, voitiin johtimien lämpenemistä aiheuttavan tehon suuruudeksi laskea 160 ampeerin virralla 48 wattia.



Kuva 8. AX3- ja AX5-vetolaitteissa käytetyn moottorin lämpötilan (yhtenäinen viiva) ja tehon (katkoviiva) muutos ajan funktiona.



Kuva 9. AX8-vetolaitteessa käytetyn moottorin lämpötilan (yhtenäinen viiva) ja tehon (katkoviiva) muutos ajan funktiona.

8.4 Virheanalysointi

Virhettä voidaan yleisesti kuvata mitatun ja oikean arvon erotuksena. Mittauksissa esiintyvät virheet ryhmitellään tavallisesti karkeisiin, systemaattisiin ja satunnaisiin, joista epätarkoituksenmukaisesta tai väärästä mittausten menetelmästä johtuvat karkeat virheet pyritään huolellisesti erottamaan tehdyistä mittauksista. (Mittaustulosten käsittely.)

Systemaattinen virhe ilmenee aina saman suuruisena tai säännönmukaisesti olosuhteita seuraten. Käytetyt laitteet tai esimerkiksi kalibrointivirheestä johtuva mitta-asteikon paikkansapitämättömyys ovat tyypilliset syyt systemaattisen virheen syntyyn. Tehdyissä moottoritestauksissa myös voima-anturiin vaikuttavan vipuvarren pituuden määrittämisestä syntyvä virhe kuuluu samaan kategoriaan. Mittauksen ulkoisen tarkkuuden lisäämiseksi systemaattinen virhe olisi pystyttävä havaitsemaan ja poistamaan. Mikäli poistaminen ei ole täysin mahdollista, joudutaan systemaattinen virhe käsittelemään yhdessä muiden virheiden kanssa. (Mittaustulosten käsittely.)

Satunnaisvirhettä voidaan luonnehtia tulosten hajonnaksi, joka vaihtelee koetta uusittaessa. Syntyneet tulokset muodostavat jakauman tietyn todennäköisen tuloksen ympärille, mutta eivät teoriassa väärästä tulosta arvioitaessa äärettömän suurta mittausjoukkoa tilastomatematisin keinoin. Satunnaisvirhettä voidaan ilmaista suurella, joka kuvaa mittaustulosten muodostaman jakauman leveyttä. Tehdyissä mittauksissa kyseistä virhettä aiheutui kaikkien mittareiden lukemien heilahtelusta. Myös hydraulivastuksen heilahtelu testin aikana yhdessä lukemien eriaikaisen kirjaamisen kanssa aiheutti satunnaisvirhettä. Koska satunnaisen virheen osuus lopputuloksessa on pieni, voidaan tuloksen sisäinen tarkkuus todeta hyväksi. (Mittaustulosten käsittely.)

9 KÄYTTÖ- JA KEHITYSMAHDOLLISUUDET

Työn tuloksena syntyi kompakti hydraulinen moottoritestilaitteisto, jota hyödynnettiin opintolinjan Midnightsun-aurinkoveneprojektissa apuna aurinkoveneen moottorin valinnassa. Toteutuskustannuksiltaan edullinen laitteisto voisi saada osakseen kiinnostusta myös muissa erilaisten kevyiden liikennevälineiden parissa työskentelevissä harrastajapiireissä.

Uusi rakenneratkaisu aiheuttaa rajoituksia testattavan moottorin kokoon, sillä tukilaakeri ottaa vastaan moottorin massan. Suurimpien moottoreiden rakenne ja laakerointi eivät myöskään ole yleensä suunniteltu kestäämään käyttöä pelkän akselin varassa.

Muuttamalla käytettyä hammapyöräpumppua kierrostilavuuden osalta pienemmäksi voidaan suurinta mahdollista pyörimisnopeutta kasvattaa virtausnopeuden hidastuessa. Käytettävän momentin arvoa voidaan puolestaan nostaa kasvattamalla kierrostilavuutta, jolloin vastaavasti pyörimisnopeuden käyttöalue rajoittuu.

Ratkaisemalla momentin mittaukseen liittyvät ongelmat ja automatisoimalla mittaustiedon keräyksen käyttämällä Labview-ohjelmaa olisi laitteiston hyödyntämiseen monipuoliset mahdollisuudet.

LÄHTEET

Hydrauliteknikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Konetekniikan osasto, Mekatroniikan ja virtuaalisuunnittelun laboratorio.

Saatavissa:

<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bk60a0001/lisatty/hydrauliteknikka.pdf>
[viitattu 28.10.2013].

Inkinen, Pentti; Manninen, Reijo & Tuohi, Jukka. 2006. Momentti 2
Insinöörifysiikka. 2. painos. Helsinki. Otava.

Kauranne, Heikki; Kajaste, Jyrki & Vilenius, Matti. 2008. Hydrauliteknikka.
1. painos. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy.

Koululaisen tietosanakirja, osa 1. 1969. Toinen, tarkistettu painos. Helsinki:
Sanoma Osakeyhtiö.

Mittau tulosten käsittely

Saatavissa: <http://tfy.tkk.fi/kurssit/Tfy-3.15x/Teoria/Tulostenkasittely.pdf>
[viitattu 7.9.2013].

Pittman Innovation Award. Sail Magazine.

Saatavissa: <http://www.sailmagazine.com/pittman-innovation-awards/2013-pittman-innovation-awards> [viitattu 24.10.2013].

Power 26-104, Technical data & dimensions.

Saatavissa: <http://www.torqueedo.com/us/electric-outboards/power-26-104-intelligent-lithium-battery/technical-data-dimensions> [viitattu 3.11.2013].

Tekniikan kaavasto. 2005. 5. painos. Jyväskylä: AMK-Kustannus Oy.
Tammertekniikka

Liite 1

Hydraulijärjestelmä

Komponentti	Tyyppi	Määrä	Hinta
Hammaspyöräpumppu	P0214DHG	1kpl	104,03
Tukilaakeri	13-SUR2C	1kpl	144,60
Vastusventtiili	R 3/4" nuppis.	1kpl	62,50
Paineenrajoitusventtiili	G3/4 80-300bar	1kpl	44,00
Paluusuodatin	säiliön kannelle	1kpl	30,65
Painemittari	250 bar	1kpl	10,08
Mittariventtiili	suora R1/4"	1kpl	18,90
Huohotinkorkki	SMN.46-1/4-F40	1kpl	10,40
Välikytkinpaketti	0,5-0,75kw	1kpl	18,41
Kaksoisnippa	3/4"	6kpl	34,80
L-Nippa	BSP uk/uk/sk 3/4"	1kpl	27,00
Nippa	3/4" Ep kontramutterilla	1kpl	19,50
Nippa	1/2x3/4"	1kpl	4,65
Nippa	uk/sk R3/4"	1kpl	12,20
Jatkomuhvi	3/4"	1kpl	9,00
Jatkomuhvi	1/4"	1kpl	4,30
Tiiviste	27,0x35,3x2,0	6kpl	8,40
Tiiviste	21,5x38,6x2,5	1kpl	1,05
Liitin	Bsp 12-12	1kpl	7,80
Polttoaine/öljyletku	19/29mm	0,3m	6,69
Hydrauliikkatiiviste	50g	1kpl	22,20
Yhteensä:			601,16

Mittausjärjestelmä

Komponentti	Tyyppi	Määrä	Hinta
Hall-anturi	LEM HAS 300-S	1kpl	29,49
Voima-anturi	Zemic L6N / 300 N	1kpl	58,01
Induktio anturi	Sick IME12-04NPSZC0S	1kpl	31,14
Yhteensä:			118,64

Liite 2/1

AX3, AX5	I [A]	U [V]	n [1/min]	F [N]	M [Nm]	P_{otto} [W]	P_{anto} [W]	η [%]
06.06.13	3,4	52,2	799	8,5	1,5	175	125	71,6
	5,6	52,2	994	12,5	2,2	290	229	79,0
	9,0	52,1	1209	17,5	3,1	467	390	83,5
	14,5	51,8	1482	24,9	4,4	751	680	90,6
	43,2	50,8	2224	50,7	8,9	2195	2078	94,7
	53,5	50,5	2400	56,5	9,9	2702	2499	92,5
AX3, AX5	I [A]	U [V]	n [1/min]	F [N]	M [Nm]	P_{otto} [W]	P_{anto} [W]	η [%]
06.06.13	96,0	50,5	2600	87,7	15,4	4848	4203	86,7
	72,4	50,7	2400	73,3	12,9	3671	3242	88,3
	55,7	51,0	2205	62,1	10,9	2841	2524	88,8
	25,8	51,7	1697	37,5	6,6	1334	1173	87,9
	17,1	51,9	1463	28,3	5,0	887	763	86,0
	10,3	52,1	1209	20,0	3,5	536	446	83,1
	5,9	52,2	975	13,9	2,4	308	250	81,1
	3,7	52,3	800	9,6	1,7	194	142	73,1
	1,6	52,3	500	5,2	0,9	84	48	57,3
AX3, AX5	I [A]	U [V]	n [1/min]	F [N]	M [Nm]	P_{otto} [W]	P_{anto} [W]	η [%]
06.06.13	102,5	49,2	2381	99,0	17,4	5043	4344	86,1
	80,0	49,5	2205	84,3	14,8	3960	3426	86,5
	24,2	50,8	1502	31,8	5,6	1229	880	71,6
	16,4	50,9	1306	30,6	5,4	835	737	88,2
	8,3	51,2	1014	19,1	3,4	425	357	84,0
	4,8	51,3	819	12,9	2,3	246	195	79,1
	1,7	51,4	506	5,7	1,0	86	53	61,6
	16,3	51,0	1287	31,1	5,5	831	738	88,7
AX8	I [A]	U [V]	n [1/min]	F [N]	M [Nm]	P_{otto} [W]	P_{anto} [W]	η [%]
29.05.13	5,5	56,9	506	24,9	4,4	314	232	74,1
	9,9	56,8	702	35,2	6,2	561	455	81,2
	16,2	56,7	897	47,0	8,3	920	777	84,4
	28,1	56,5	1111	68,5	12,1	1588	1403	88,3
	105,0	55,2	1795	157,0	27,6	5796	5194	89,6
	136,0	54,3	1950	176,0	31,0	7385	6325	85,7
	103,0	54,5	1950	137,6	24,2	5614	4945	88,1
	133,7	53,9	2107	162,1	28,5	7206	6295	87,4
	102,8	54,1	2107	127,2	22,4	5561	4940	88,8
	134,2	53,5	2283	150,6	26,5	7180	6337	88,3
	148,7	52,8	2350	151,4	26,6	7851	6557	83,5
	101,6	53,3	2381	111,0	19,5	5415	4871	90,0
	135,6	52,6	2600	133,2	23,4	7133	6383	89,5
	144,8	52,3	2600	140,5	24,7	7573	6733	88,9

Liite 2/2

AX8	I [A]	U [V]	n [1/min]	F [N]	M [Nm]	P _{otto} [W]	P _{anto} [W]	η []
10.05.13	149,2	53,8	2400		31,8	8027	7992	99,6
	147,5	53,3	2400		30,8	7862	7741	98,5
	151,5	53,1	2400		30,4	8045	7640	95,0
	150,3	53,1	2400		29,8	7981	7490	93,8
	151,8	53,1	2400		29,5	8061	7414	92,0
	156,9	51,0	2400		29,0	8002	7276	90,9
	158,5	50,6	2400		29,0	8020	7288	90,9
	160,0	50,1	2400		28,8	8016	7238	90,3
	161,2	49,6	2365		28,8	7996	7133	89,2
	162,5	49,3	2372		28,9	8011	7166	89,5
	163,4	49,0	2370		28,8	8007	7135	89,1
	164,3	48,6	2367		28,7	7985	7109	89,0
	165,2	48,4	2384		28,6	7996	7133	89,2
	166,3	48,1	2364		28,7	7999	7100	88,8
	167,1	47,9	2365		28,5	8004	7058	88,2
	167,8	47,7	2364		28,6	8004	7075	88,4
	168,4	47,5	2363		28,5	7999	7052	88,2
	169,4	47,3	2362		28,5	8013	7044	87,9
	170,1	47,1	2360		28,5	8012	7031	87,8
	169,0	46,8	2350		28,2	7909	6940	87,7
	171,0	46,5	2300		28,9	7952	6961	87,5
AX8	I [A]	U [V]	n [1/min]	F [N]	M [Nm]	P _{otto} [W]	P _{anto} [W]	η []
14.05.13	9,2	54,3	1151		21,6	500	236	47,3
	15,0	54,2	1151		24,0	813	528	64,9
	21,3	54,1	1151		26,6	1152	836	72,6
	27,9	54,0	1151		29,3	1507	1166	77,4
	33,6	53,8	1151		31,6	1808	1449	80,1
	41,2	53,6	1151		34,7	2208	1813	82,1
	48,0	53,4	1151		37,3	2563	2127	83,0
	57,0	53,2	1151		40,4	3032	2499	82,4
	67,2	53,0	1151		43,4	3562	2870	80,6
	78,2	52,7	1151		46,5	4121	3235	78,5
AX8	I [A]	U [V]	n [1/min]	F [N]	M [Nm]	P _{otto} [W]	P _{anto} [W]	η []
14.05.13	5,7	53,9	1404		20,7	307	159	51,7
	11,8	53,8	1404		22,9	635	475	74,8
	19,3	53,7	1404		25,2	1036	816	78,7
	26,8	53,5	1404		27,6	1434	1166	81,3
	34,1	53,4	1404		29,9	1821	1517	83,3
	42,1	53,2	1404		32,2	2240	1842	82,3
	49,5	53,0	1404		34,6	2624	2202	84,0
	57,5	52,8	1404		36,9	3036	2541	83,7
	67,1	52,5	1404		40,0	3523	2989	84,8
	75,4	52,3	1404		42,3	3943	3327	84,4
	84,8	52,0	1404		44,8	4410	3695	83,8
	95,7	51,7	1404		48,1	4948	4187	84,6
	108,8	51,2	1404		51,1	5571	4621	83,0

Liite 2/3

AX8	I [A]	U [V]	n [1/min]	F [N]	M [Nm]	P _{otto} [W]	P _{anto} [W]	η [%]
15.05.13	7,7	57,5	1600		19,7	443	10	2,3
	12,9	57,3	1600		21,0	739	231	31,3
	20,4	57,1	1600		23,6	1165	667	57,2
	28,9	56,9	1600		26,3	1644	1119	68,1
	37,1	56,7	1600		29,0	2104	1563	74,3
	44,7	56,5	1600		31,4	2526	1975	78,2
	53,5	56,3	1600		34,1	3012	2418	80,3
	63,1	56,1	1600		36,9	3540	2887	81,6
	74,0	55,8	1600		39,6	4129	3346	81,0
	88,8	55,4	1600		42,8	4920	3875	78,8
	101,2	55,1	1600		45,8	5576	4387	78,7
	100,7	55,0	1600		47,4	5539	4661	84,2
	116,7	54,6	1600		50,7	6372	5204	81,7

AX8	I [A]	U [V]	n [1/min]	F [N]	M [Nm]	P _{otto} [W]	P _{anto} [W]	η [%]
29.05.13	5,5	56,2	506	23,3	4,1	310	217	70,0
	15,3	56,0	916	42,3	7,4	858	713	83,1
	21,2	56,0	1541	34,4	6,1	1189	977	82,2
	29,1	55,9	1541	48,7	8,6	1627	1383	85,0
	58,9	55,2	2010	77,9	13,7	3251	2886	88,8
	77,9	54,8	2224	92,4	16,3	4269	3787	88,7
	98,3	54,4	2420	106,0	18,7	5348	4728	88,4
	120,6	53,8	2600	120,2	21,2	6488	5760	88,8
	141,5	53,2	2600	138,6	24,4	7528	6642	88,2

AX8	I [A]	U [V]	n [1/min]	F [N]	M [Nm]	P _{otto} [W]	P _{anto} [W]	η [%]
06.06.13	171,0	49,1	2600	152,8	26,9	8396	7322	87,2
	124,9	49,8	2381	124,4	21,9	6220	5459	87,8
	91,5	50,6	2166	102,4	18,0	4630	4088	88,3
	72,3	51,0	2010	87,0	15,3	3687	3223	87,4
	53,2	51,4	1815	72,6	12,8	2734	2429	88,8
	16,0	52,3	1209	33,0	5,8	837	735	87,9
	9,8	52,5	995	23,1	4,1	515	424	82,3
	5,6	52,7	799	15,4	2,7	292	227	77,5
	2,0	52,8	506	6,7	1,2	106	62	59,2

AX8	I [A]	U [V]	n [1/min]	F [N]	M [Nm]	P _{otto} [W]	P _{anto} [W]	η [%]
06.06.13	4,0	52,8	799	9,6	1,7	210	141	67,3
	6,8	52,8	994	14,7	2,6	359	269	75,0
	11,2	52,6	1209	21,5	3,8	589	479	81,3
	34,5	52,0	1834	46,7	8,2	1794	1579	88,0
	44,5	51,5	2010	55,2	9,7	2292	2045	89,2
	58,1	51,1	2205	65,3	11,5	2969	2654	89,4
	74,4	50,6	2400	76,1	13,4	3765	3366	89,4
	94,7	50,0	2600	88,0	15,5	4735	4217	89,1

AX8	I [A]	U [V]	n [1/min]	F [N]	M [Nm]	P _{otto} [W]	P _{anto} [W]	η [%]
06.06.13	173,2	47,2	2400	159,5	28,1	8175	7055	86,3
	126,0	48,2	2205	131,1	23,1	6073	5328	87,7
	92,3	49,0	2010	107,7	19,0	4523	3990	88,2
	67,1	49,6	1815	88,1	15,5	3328	2947	88,6
	20,5	50,7	1209	40,4	7,1	1039	900	86,6
	12,1	51,0	994	27,6	4,9	615	506	82,3
	6,9	51,1	799	18,8	3,3	353	277	78,5
	2,3	51,3	506	8,4	1,5	119	78	66,1